

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Александра Сергеевича Куценко
«Локальные магнитные поля на Солнце»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Научная школа Крымской астрофизической обсерватории на сегодняшний день является одним из самых оживленных центров солнечной физики в России со своей богатой историей, наследием, наблюдательной базой, собственным банком данных, своей конференцией, научным журналом и новыми специалистами. Соискатель степени является ведущим научным сотрудником обсерватории, он молод, что вдвойне ценно. Диссертация относится к классу исследований, связанных с получением и интерпретацией наблюдательных данных. Внимание сосредоточено на анализе магнитного потока, проявленного на уровне фотосферы. Комплексно анализируются активные и эфемерные области. Проанализированы скорости нарастания магнитного потока, вспышечная продуктивность, особенности вращения, электрические токи, скрученность магнитных структур, их вклад в среднее поле звезды на разных этапах эволюции. А также **особенно ценно**, что соискатель занимает ключевую роль в появлении на базе Крымской обсерватории нового инструмента – спектрополяриметра, имеющего 4 режима наблюдений.

Сильные магнитные поля, распадаясь, формируют среднее магнитное поле; они постепенно охватывают приполярные области, аннигилируют с магнитным потоком предыдущего цикла, что наблюдается как переполюсовка крупномасштабного поля и предположительно служат источником зарождения корональных дыр на королевских широтах. В современных исследованиях, фокус внимания на слой, где зарождаются сильные магнитные поля и откуда поднимаются жгуты магнитных силовых линий, сместился на приповерхностные слои (лептоклин), хотя еще пару десятилетий назад основной областью зарождения активных областей считался тахоклин. Заново пересматривается относительная роль силы Кориолиса и турбулентных течений. Таким образом, комплексное исследование эволюции когерентных структур магнитных жгутов в приповерхностном конвективном слое и фотосфере является **актуальным и значимым**.

Новизна научного исследования и результатов

Разработан ряд оригинальных методик и алгоритмов для исследования зоны зарождения и эволюции локальных магнитных полей активных и эфемерных областей, адаптированы методы расчетов плотности электрических токов и токовой спиральности магнитных жгутов, формирующих активные области, разработан новый инструмент для проведения прецизионной спектрополяриметрии одновременно спокойных и активных участков солнечной атмосферы для десятков спектральных линий. Получены новые фундаментальные результаты о структуре магнитных жгутов и этапах выхода магнитного потока на поверхность. Все это **новые и ценные достижения** в области физики Солнца.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов подкреплена значимым количеством публикаций в высокорейтинговых журналах с международным рецензированием. Материалы всех глав прошли публичное обнародование и экспертное обсуждение на почти трех десятках конференций. Большая часть результатов получена на больших выборках в сотни, а иногда и тысячи активных областей, что позволяет утверждать, что выводы статистически значимы. Также весь объем работы выполнен в тесном контакте с коллегами по месту работы, в Крымской астрофизической обсерватории, что увеличивает долю живых обсуждений и совместной перепроверки полученных результатов.

Практическая ценность

Относительно практической ценности диссертационной работы отмечу, что, на мой взгляд, разработка и создание нового наблюдательного инструмента в области физики Солнца событие редкое, ценное и праздничное. Оно, верю, приближает тот день, когда наши работы по солнечной и солнечно-земной физике будут в значительной степени опираться на данные наших российских наземных баз и космических миссий. И даже несмотря на то, что прибор вынужденно создан с минимальным количеством оптических элементов, он позволяет одновременное наблюдение во многих спектральных линиях, а постобработка изображений в континууме позволяет улучшить пространственное разрешение до $0,3''$.

Перейду к **содержанию** диссертации. Работа объемом 268 страниц состоит из введения, пяти глав и пяти защищаемых положений, четырехстраничного заключения и списка литературы из 374-ти наименований. С 2016 по 2024 г. работа прошла апробацию на 27 конференциях международного и всероссийского уровня. За эти же года, по материалам диссертации опубликовано более 20 работ, почти все входят в перечень ВАК изданий. В 14-ти публикациях Александр Сергеевич Куценко является первым автором.

Во **введении**, как и положено, указаны все необходимые вводные данные, такие как тематика исследования, цель и задачи работы, научная новизна, научная и практическая значимость, описаны методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, апробация, список публикаций и личный вклад автора.

В **первой главе** разобрана методология восстановления компонент вектора магнитного поля звезды по описанию поляризованного состояния электромагнитных волн с использованием параметров Стокса. Изложен принцип обратной задачи спектроскопии в базовых приближениях атмосферы Милна-Эддингтона и слабого магнитного поля, а также метода центра тяжести.

Описаны эксперименты по наблюдению нижней атмосферы Солнца с высоким пространственным разрешением на базе башенного солнечного телескопа им. А.Б. Северного БСТ-1. Настройкой программных пакетов для пост-обработки изображений, полученных с использованием короткой экспозиции (десятки миллисекунд), успешно удалось преодолеть размытие изображения из-за атмосферной турбулентности. В результате в рамках работы было достигнуто разрешение $0,3''$ против $1''$ инструмента SDO/HMI космической обсерватории НАСА.

Далее описано устройство, оптическая схема и принцип работы новых спектрополяриметра и анализатора поляризации; разработаны новые алгоритмы, проведены необходимые тесты на эталонных источниках. Выполнено измерение поляризации излучения Солнца используя формализм матриц Мюллера. Проведена процедура коррекции инструментальной поляризации. По результатам данной

главы представлен новый инструмент, работающий в четырех режимах наблюдений: спектрограф, спектрополяриметр, режим для измерения среднего поля Солнца как звезды и для мониторинга быстрых процессов типа вспышек.

Вторая глава посвящена задаче формирования активных областей на видимой поверхности Солнца. Диссертант ставит перед собой даже большую задачу, чем указана во введении под пунктом 1, а именно, сделана попытка осмыслить целостную картину всплытия магнитных жгутов, видимых на магнитограммах как активные и эфемерные области, а также осмыслить роль силы Кориолиса и конвективных турбулентных потоков. Диссертант размышляет о различной геометрии магнитных жгутов, их когерентности и подфотосферной фрагментации, роли локального турбулентного динамо. По данным большой выборки объектов анализируется скорость нарастания магнитного потока, утверждается степенная зависимость скорости от максимального потока. Утверждается, что процессы всплытия и диссипации магнитного потока регулируются разными механизмами, причем скорость нарастания превосходит скорость диссипации. Также обнаружена степенная зависимость между максимальным магнитным потоком и линейным размером активной области, но также отмечено, что центры ведущей и хвостовой полярностей продолжают отдаляться и после достижения максимального потока. Выполнен анализ вспышечной продуктивности активных областей в зависимости от скорости нарастания потока. Однозначную связь выявить не удалось, но сделано заключение, что вспышки более вероятны в течение 10-30 часов после всплытия нового магнитного потока в активной области.

Третья глава занимается вопросом вращения магнитных образований на уровне фотосферы. Представлены разные подходы к измерению скорости вращения; отмечено, что все они чувствительны к изменению формы трассируемых структур. Во внимание взято то, как профили вращения дышат в зависимости от возраста групп пятен, их размеров, долготной вытянутости, фазы цикла, класса активной области и других характеристик. Также затронут вопрос о стратификации скорости вращения в зависимости от слоя атмосферы. Подробно дискутируется решение обратной задачи о восстановлении глубины залегания магнитного жгута, породившего активную или эфемерную область. Диссертант приводит аргументы в пользу трассирования магнитного потока как более корректного подхода по сравнению с трассированием групп пятен в видимом свете. Более быстрая диссипация хвостовых пятен в континууме приводит к кажущемуся более быстрому движению всей активной области. Показано, что активные области с меньшим максимальным магнитным потоком, в частности эфемерные области, имеют тенденцию к более быстрому вращению, а униполярные активные области, которые можно классифицировать как остатки распадающихся активных областей, вращаются медленнее. Предполагается, что небольшие различия во вращении активных областей, нарушающих и подчиняющиеся законам Хэйла и Джоя, связаны с разницей магнитного потока в них, а не с разной глубиной залегания соответствующих им магнитных жгутов. Предложено объяснение кажущегося ускорения или замедления активной области на стадии ее всплытия посредством разного наклона магнитного жгута в восточном и западном направлении; проанализирована роль силы Кориолиса. Показано, что после завершения фазы подъема магнитного жгута, угловая скорость активных областей остается неизменной относительно измеренного усредненного профиля вращения.

Четвертая глава посвящена анализу спиральности и токовых систем активных областей. Изложены основные приближения для оценки плотности электрического тока по измерениям компонент поперечного магнитного поля. Проведено сравнение карт токовой спиральности по измерениям на SDO/HMI и Hinode/SOTSP. Здесь

выражу надежду, что в скором будущем, анализ пространственного распределения спиральности и ее интегральных характеристик можно будет проводить и по измерениям на БСТ-1. Анализ отражательной неинвариантности токовой спиральности в полушариях выполнен по измерениям угла наклона активной области, ее средней скрученности и крупномасштабного изгиба. Сделан вывод, что ожидаемый знак спиральности, согласно правилу полушарий, возникает не на стадии всплытия, а активная область постепенно поворачивается с ходом своего жизненного цикла. Скорость нарастания потока в активной области показала слабую связь с увеличением средней скрученности. К исследованию также была привлечена флэтнесс-функция токовой спиральности для оценки ее перемежаемости, однако анализ был выполнен только для трех активных областей. Выдвинуто предположение, что перед всплытием активной области происходят измерения в системе ее электрических токов, вызывая фрагментацию.

Пятая глава посвящена поиску ответа на вопрос какие магнитные поля дают наибольший вклад в дисбаланс среднего магнитного поля Солнца как звезды. Рассмотрен вопрос правомочности оценки среднего магнитного поля путем усреднения плотности магнитного потока по всем пикселям магнитограмм полного диска. Также рассматривается проблема искусственных орбитальных вариаций магнитного поля в измерениях SDO/HMI. Подробно дискутируется роль порога магнитного потока, разграничивающего разные конгломерации магнитного поля и роль сглаживания, превращающего мелкомасштабную мозаику магнитных элементов в крупномасштабные структуры перемежающейся полярности. Сделан вывод, что дисбаланс среднего магнитного потока складывается из остатков активных областей, суммарная площадь которых не превышает 10% площади солнечного диска.

После прочтения диссертации у меня возникли следующие **вопросы**:

- 1) На рисунке 2.17 для оценки высокой вспышечной продуктивности активной области используется скорость нарастания потока по данным Sun & Norton (2017) – $4,9 \cdot 10^{20}$ Мкс ч⁻¹, вместо оценки, полученной самим соискателем $5,9 \cdot 10^{20}$ Мкс ч⁻¹. Почему было принято решение заимствовать оценку из другой работы и отказаться от своей?
- 2) Эфемерные области, в целом, довольно загадочные объекты. Например, распределение их усредненного угла наклона по широте показало, что эфемерные области имеют приблизительно одинаковое абсолютное значение угла наклона и этот наклон противоположен наклону регулярных активных областей (Tlatov, Illarionov, Sokoloff, Pipin, MNRAS, 2013). В представленной диссертационной работе активные и эфемерные области также справедливо разделены, что указано уже в цели работы. Что удалось прояснить о природе эфемерных областей и их роли в общей эволюции магнитного поля?
- 3) Здесь перечислю несколько связанных вопросов по главе 3:
 - а) На страницах 157–158 указано, что на рисунке 3.4 показаны гистограммы распределений разностей **синодических** скоростей со средними значениями $14,261^\circ$ сут⁻¹ для магнитограмм и $14,706^\circ$ сут⁻¹ для континуума. Однако, данные оценки довольно велики для синодических скоростей. На странице 159 повторно указано, что уже рисунок 3.5 показывает **синодические** скорости, аппроксимированные **сидерическими** профилями. Не закралась ли тут путаница?
 - б) Здесь же для обеих аппроксимаций почти все значения средних скоростей (кружки на рис 3.5) лежат над аппроксимирующими кривыми. Что может быть причиной? Чтобы убедиться в правомочности аппроксимаций,

было бы полезно указать величину суммы квадратов ошибок (SSE) и коэффициент детерминации R^2 .

в) Красная аппроксимирующая кривая рис. 3.5 имеет максимальное значение, превышающее $14,4^\circ \text{ сут}^{-1}$ (возможно $14,43^\circ \text{ сут}^{-1}$), хотя на странице 159 указано, что аппроксимация для магнитограмм сделана по формуле 3.3, где $A=14,34^\circ \text{ сут}^{-1}$. Сами же красные кружки в районе экватора соответствуют еще большим скоростям порядка $14,5^\circ \text{ сут}^{-1}$. На какую оценку стоит опираться и в чем причина рассогласования?

г) Также обращает на себя внимание оценка коэффициента A (приэкваториальная скорость) для групп солнечных пятен в континууме порядка $14,7^\circ \text{ сут}^{-1}$, что существенно превышает все ранее полученные оценки для групп пятен, представленные в таблице 2 в пределах $14,3\text{--}14,5^\circ \text{ сут}^{-1}$. В чем может быть причина?

д) В главе 3, а именно на стр. 171 мне не хватило обсуждения альтернативной гипотезы глубины укоренения активных областей и пор, согласно результатам Tlatov & Tlatova (2024), где предложена качественно иная картина.

В качестве **несущественных** отмечу следующие замечание:

- 1) В тексте присутствуют повторы. Так дважды излагается общая концепция динамо-теории во введении и в главе 2, дважды излагается способ расчета наклона спектра на страницах 110 и 129. Подпись для рис. 2.20 не соответствует рисунку. В целом глава 2 содержит существенное количество опечаток.
- 2) В тексте встречаются качественные сравнения, такие как лучше-хуже, высокий – низкий и другие, что может быть интерпретировано неоднозначно. Например, на странице 111 указано, что показатель степени 0,48 находится в **некотором согласии** с результатами предыдущих работ, однако, на следующей странице в этом же контексте указано, что различные исследования дают **существенно отличающиеся** значения. Другой пример: из рисунка 2.19 на странице 128 сделан вывод, что быстро всплывающие активные области будут иметь **высокий** вспышечный индекс. Однако, согласно рисунку 2.19 области со скоростью всплытия $4\text{--}5 \cdot 10^{20} \text{ Мкс ч}^{-1}$, как и области с в два раза меньшей скоростью всплытия ($2\text{--}3 \cdot 10^{20} \text{ Мкс ч}^{-1}$), имеют вспышечный индекс FI от 10 до 100. Поскольку ось для FI указана в пределах от 1 до 500, то, что считать **высоким** вспышечным индексом?
- 3) Рисунки зачастую взяты из публикаций без переработки. Поэтому подписи на самих рисунках иногда теряют актуальность. Так рисунок 2.19 относит черные символы к статье Куценко с соавторами, а красные символы к данной работе (This work), хотя и те и другие данные на момент написания диссертации уже относятся к единой диссертационной работе.

По итогу оппонирования и оценки значимости защищаемых положений могу заключить, что соискатель степени доктора физико-математических наук Александр Сергеевич Куценко является высококлассным специалистом в области измерения магнитных полей, в разработке и создании наблюдательных инструментов, имеет широкий спектр навыков для разработки алгоритмов и методов обработки данных. В рамках защищаемой работы создан новый инструмент с большим потенциалом. Весь материал диссертации изложен в доступной форме, что положительно характеризует способности диссертанта в образовательном направлении для

обучения и подготовки нового поколения специалистов. Отмечу, что под руководством диссертанта уже успешно защитился молодой кандидат наук.

Указанные замечания не снижают значимости защищаемых положений. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне, получены значимые научные результаты, среди которых особо отмечу вклад диссертанта в появление нового солнечного инструмента.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Цели диссертации соответствуют полученным результатам, а результаты прошли апробацию на конференциях и детально отражены в публикациях в высокорейтинговых научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов, утвержденных ВАК. Тема диссертации соответствует заявленной научной специальности. Полученные результаты, выводы и защищаемые положения обоснованы и обладают практической ценностью.

Считаю, что представленная диссертация «Локальные магнитные поля на Солнце» удовлетворяет требованиям, предъявляемым в Положении о порядке присуждения ученых степеней, и предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, соответствует критериями, установленным в п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Александр Сергеевич Куценко заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

Доцент Санкт-Петербургского государственного университета
д.ф.-м.н. Надежда Валерьевна Золотова
специальность 01.03.03 «Физика Солнца»

Физический факультет

Санкт-Петербургского государственного университета,
198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., д. 1.
тел.: +7-905-213-19-42; e-mail: n.zolotova@spbu.ru

11.02.2026

Личную подпись *Золотова Н.В.*
заверяю *Куф*
подпись начальника
О.С. Суворова



11.02.2026